

DOI: 10.18721/JCSTCS.11409  
УДК 681.51

## УПРАВЛЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫМ СГЛАЖИВАНИЕМ ФРИКЦИОННЫХ АВТОКОЛЕБАНИЙ ПРИ КОНТАКТНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ РОБОТА С ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

*Т.А. Байдина, С.Ф. Бурдаков, О.Б. Шагниеф*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассмотрена задача адаптивного подавления фрикционных автоколебаний системы «робот-инструмент-обрабатываемая поверхность», возникающих при контактном взаимодействии инструмента с поверхностью на ползучих скоростях движения инструмента вдоль поверхности с заданным прижатием к ней в условиях нелинейного трения в области контакта. Подавление фрикционных автоколебаний осуществляется с помощью внешнего импульсного воздействия на систему. При моделировании процессов в области контактного взаимодействия используется модель трения со Штрибек-эффектом, а также учитываются инерционность и податливость элементов системы, что позволило получить процессы, близкие к наблюдаемым на практике. Показано, что в этих условиях на ползучих скоростях движения инструмента относительно поверхности возникают фрикционные автоколебания с кратковременными остановками инструмента. Импульсное воздействие на систему сглаживает процессы, однако после снятия импульсов автоколебания возобновляются. Предложен адаптивный вариант импульсного сглаживания, при котором импульсы подаются на систему по мере возникновения автоколебаний. Небольшое увеличение предписанной скорости движения инструмента после снятия импульсов исключает условия возникновения автоколебаний. Алгоритм реализован с помощью логического переключающего устройства, эффективность работы которого подтверждена моделированием в программном комплексе Matlab.

**Ключевые слова:** система «робот-инструмент-обрабатываемая поверхность», контактное взаимодействие, нелинейное трение, Штрибек-эффект, ползучая скорость, фрикционные автоколебания, силовое ощущение, адаптивное импульсное сглаживание.

**Ссылка при цитировании:** Байдина Т.А., Бурдаков С.Ф., Шагниеф О.Б. Управление импульсным сглаживанием фрикционных автоколебаний при контактном взаимодействии робота с обрабатываемой поверхностью // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2018. Т. 11. № 4. С. 119–129. DOI: 10.18721/JCSTCS.11409

## CONTROL OF FRICTION SELF-OSCILLATIONS PULSE SMOOTHING IN CONTACT INTERACTION OF A ROBOT WITH THE WORKING SURFACE

*T.A. Baidina, S.F. Burdakov, O.B. Shagniev*

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,  
St. Petersburg, Russian Federation

We have considered the problem of adaptive suppression of friction self-oscillations in a robot-tool-working surface system. These oscillations appear under contact interaction of the tool with the surface in case of nonlinear friction in the contact area and creeping speed of the tool motion along the surface. Frictional self-oscillation suppression is carried out using an external pulse load on the system. The friction model with Stribeck's effect in the contact area, inertia and flexibility of the system elements are taken into account in modeling, making it possible to obtain processes close to those observed in practice. It is shown that friction self-oscillations with short-term tool stops arise under these conditions at slow speed of the tool motion along the surface. The pulse load on the system smoothes the processes but self-oscillations appear again after unloading of the pulses. In this paper, we propose an adaptive version of pulsed smoothing. Pulses are fed to the system when auto-oscillations occur. A small increase of the prescribed speed of the tool motion after pulse unloading eliminates the conditions in which self-oscillations occur. The proposed algorithm is implemented using the logical block whose efficiency is confirmed by modeling in Matlab.

**Keywords:** robot-tool-working surface system, contact interaction, nonlinear friction, Stribeck's effect, creeping speed, friction self-oscillations, force sensing, adaptive pulse smoothing.

**Citation:** Baidina T.A., Burdakov S.F., Shagniev O.B. Control of friction self-oscillations pulse smoothing in contact interaction of a robot with the working surface. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems, 2018, Vol. 11, No. 4, Pp. 119–129. DOI: 10.18721/JCSTCS.11409

### Введение

В настоящее время одной из важнейших задач машиностроения остается создание современных робототехнических комплексов, позволяющих автоматизировать процессы механообработки, сборки и т. д. [1, 2]. Особенность этих процессов связана с контактным взаимодействием инструмента, установленного на роботе, с обрабатываемой поверхностью [3, 4]. Такое взаимодействие, как правило, имеет нелинейный характер, а система «робот-инструмент-обрабатываемая поверхность» обладает инерцией и податливостью [5]. В совокупности эти факторы могут приводить к возникновению нежелательных режимов типа автоколебаний и даже

к неустойчивости [6, 7]. Эффективно управлять робототехническими системами в подобных случаях можно только с помощью силомоментного очувствления робота, когда обратные связи формируются с учетом сил и моментов взаимодействия в области контакта инструмента и обрабатываемой поверхности [8–10 (2 ролика)].

В данной статье рассматривается задача управления фрикционными автоколебаниями, возникающими на ползучих скоростях движения инструмента вдоль поверхности при заданном прижатии к ней в условиях нелинейного трения с эффектом Штрибека в области контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью. Ранее в

[11] было установлено, что эффективное подавление фрикционных автоколебаний возможно с помощью импульсного сглаживания нелинейного трения. В настоящей работе показано, как с помощью дополнительного контура адаптации осуществлять импульсное сглаживание в режиме online по мере возникновения нежелательных режимов.

### Постановка задачи

Пусть робот обеспечивает движение по трем взаимно перпендикулярным степеням подвижности. На роботе в упругом подвесе закреплен рабочий инструмент. Упругий подвес обеспечивает силовое ощущение робота по трем осям. Обрабатываемая поверхность имеет гладкий профиль. При таких предположениях динамическая взаимосвязь степеней подвижности робота в основном проявляется через силы трения в области контактного взаимодействия инструмента с обрабатываемой поверхностью. Расчетная схема системы «робот-инструмент-обрабатываемая поверхность» представлена на рис. 1. Учитывается движение робота по горизонтальной и вертикальной осям.

На расчетной схеме введены следующие обозначения:  $m$  – приведенная масса руки робота;  $m_s$  – приведенная масса инструмента;  $c_{sx}$ ,  $c_{sy}$  – жесткости упругого подвеса инструмента;  $b_x$ ,  $b_y$ ,  $b_{sx}$  – коэффициенты вязкого трения;  $F_x$ ,  $F_y$  – силы, развиваемые приводами робота;  $F_f$  – сила трения в области контакта инструмента с поверхностью;  $R_x$ ,  $R_y$  – горизонтальная и нормальная реакции упругого подвеса инструмента;  $y_{sf}(x)$  – уравнение обрабатываемой поверхности.

Рассматривается движение робота с заданной скоростью  $v_x^d = \dot{x}^d$  вдоль обрабатываемой поверхности  $y_{sf}(x)$  при заданном прижатии  $F_y^d$  к ней. Считается, что переходные процессы, связанные с выходом робота на контакт с обрабатываемой поверхностью, завершены, а дальнейшее движение робота происходит без нарушения контакта. Известно [12], что на практике в рассматриваемых условиях при очень малой (ползучей) скорости  $v_{sx} = \dot{x}_s$  возможно прерывистое движение инструмента типа фрикционных автоколебаний с кратковременными остановками (залипаниями).

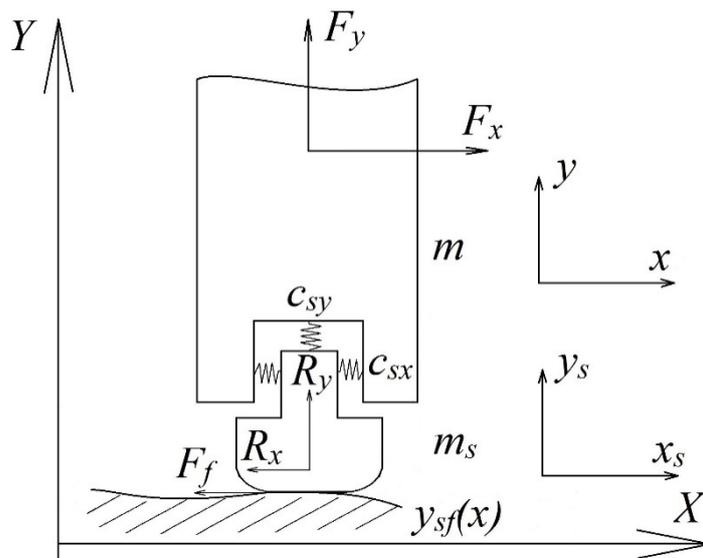


Рис. 1. Расчетная схема системы «робот-инструмент-обрабатываемая поверхность»

Fig. 1. The design scheme of the system «robot-tool-machined surface»

В работе [11] показано, что эффективным способом борьбы с залипаниями инструмента является импульсное сглаживание нелинейного взаимодействия в области контакта. Оно может быть осуществлено с помощью дополнительного внешнего импульсного воздействия на робота. Недостатком этого способа является то, что при снятии импульсного воздействия автоколебания вновь возобновляются. Таким образом, задача состоит в том, чтобы сделать процесс импульсного сглаживания адаптивным, т. е. включать внешнее импульсное воздействие на робота лишь в момент возникновения автоколебаний и снимать его при их отсутствии. Подавать импульсное воздействие постоянно нецелесообразно как по энергозатратам, так и из-за повышения общего уровня вибраций в системе «робот-инструмент-обрабатываемая поверхность».

#### Импульсное сглаживание фрикционных автоколебаний

Движение системы «робот-инструмент-обрабатываемая поверхность» в режиме контакта с поверхностью описывается следующей системой дифференциальных уравнений (см. рис. 1):

$$\begin{aligned} m\ddot{y} + b_y\dot{y} + c_{sy}(y - y_s) &= F_y - mg, \quad y_s = y_{sf}(x_s), \\ m\ddot{x} + b_x\dot{x} + c_{sx}(x - x_s) &= F_x, \\ m_s\ddot{x}_s + b_{sx}\dot{x}_s + c_{sx}(x_s - x) &= -F_f. \end{aligned} \quad (1)$$

Первое уравнение в системе (1) описывает движение робота вдоль вертикальной оси без нарушения контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью. Второе и третье уравнения – движение вдоль горизонтальной оси.

Анализ конструктивных вариантов использования инструмента с силовым чувствлением [9, 10], а также характерного рабочего частотного диапазона для подобных систем позволил при проведении моделирования выбрать следующие значения параметров системы «робот-инструмент-обрабатываемая поверхность»:  $m = 2$  кг;

$b_x = b_y = 25$  Н·с/м;  $c_{sy} = 4000$  Н/м;  $m_s = 0,5$  кг;  $b_{sx} = 5$  Н·с/м;  $c_{sx} = 3000$  Н/м.

Для принятых значений параметров корни характеристического полинома для уравнения, описывающего движение: вдоль вертикальной оси  $p_{1,2} = -6,2 \pm 44,3i$ , вдоль горизонтальной оси  $p_1 = 0$ ;  $p_2 = -20,7$ ;  $p_{3,4} = -20,9 \pm 82,5i$ .

Введем модель трения, учитывающую вязкое трение, сухое (кулоново) трение и трение с учетом Штрибек-эффекта (рис. 2):

$$F_f = \left( \alpha_0 + \alpha_1 \exp\left(-\left(\frac{v_{sx}}{v_{x0}}\right)^2\right) \right) \text{sign}(v_{sx}) + \alpha_2 v_{sx},$$

где  $\alpha_0 + \alpha_1$  – уровень максимальной силы трения покоя;  $\alpha_0 = \mu R_y$  – величина силы трения при движении, зависящая от вертикальной реакции поверхности  $R_y$  и коэффициента трения  $\mu$ ;  $\alpha_2$  – коэффициент вязкого трения;  $v_{x0}$  – параметр Штрибек-эффекта (крутизна падения силы трения в начале движения).

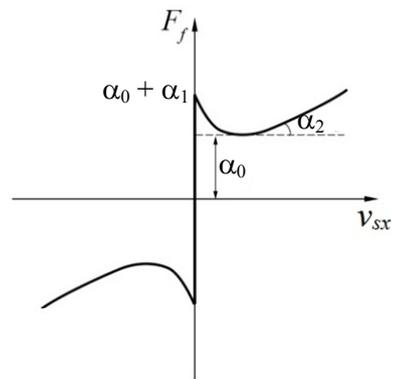


Рис. 2. Характеристика трения

Fig. 2. Friction characteristic

При появлении контакта инструмента с поверхностью на инструмент со стороны поверхности начинает действовать сила реакции  $R_y = c_{sy}(y - y_s)$ . После достижения требуемого прижатия  $F_y^d$  робот начинает перемещаться вдоль оси  $X$ , при этом поддерживается необходимое значение силы прижатия  $F_y^d$ . Требуемое прижатие обеспечивается при помощи обратной связи по

силе  $R_y$ . Позиционно-силовой закон управления по вертикальной координате имеет вид:

$$\begin{aligned} F_y &= \left( k_p + k_i \frac{1}{p} + k_d \frac{N}{1 + Np^{-1}} \right) (\tilde{y}^d - y), \\ \tilde{y}^d &= \left( \theta_p + \theta_i \frac{1}{p} + \theta_d \frac{N}{1 + Np^{-1}} \right) (F_y^d - R_y). \end{aligned} \quad (2)$$

Настройка ПИД-регуляторов (2) осуществлялась с использованием программного комплекса Matlab по показателям качества переходных процессов. При настройке учитывалась ширина диапазона рабочих частот, которая не превышала 30–40 Гц. Предписанное значение силы прижатия составляло  $F_y^d = 40$  Н. Для выбранных параметров системы получены следующие настройки:  $k_p = 25,3 \cdot 10^3$  Н/м;  $k_i = 11,2 \cdot 10^4$  Н/мс;  $k_d = 12,7 \cdot 10^2$  Н/мс;  $N = 350$ ;  $\theta_p = 0$ ;  $\theta_i = 12,4 \cdot 10^{-4}$  м/сН;  $\theta_d = 0$ ;  $N = 100$ .

Предписанное движение инструмента вдоль горизонтальной оси  $\dot{x}^d$  реализуется с помощью обратной связи по скорости руки робота  $\dot{x}$

$$F_x = \left( k_{px} + k_{ix} \frac{1}{p} + k_{dx} \frac{N_x}{1 + N_x p^{-1}} \right) (\dot{x}^d - \dot{x}). \quad (3)$$

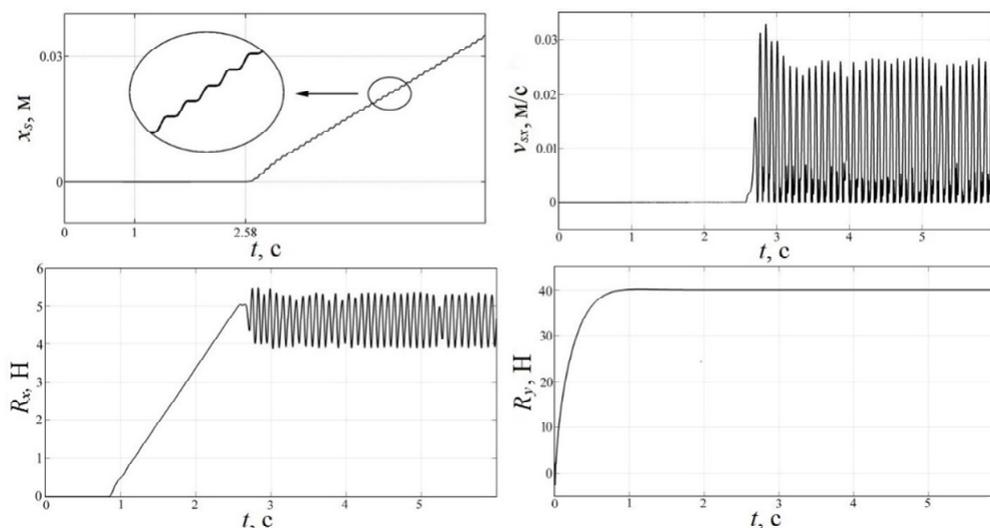


Рис. 3. Процессы возникновения фрикционных автоколебаний на ползучей скорости

Fig. 3. Friction self-oscillation processes at creeping speed

Настройка ПИД-регулятора (3) имеет вид  $k_{px} = 4,2$  Н/мс;  $k_{ix} = 319,7$  Н/мс<sup>2</sup>;  $k_{dx} = 0$  Н/мс;  $N_x = 100$ .

При моделировании использовалась модель трения, учитывающая эффект Штрибека при  $\alpha_0 + \alpha_1 = 5$  Н,  $v_{x0} = 0,01$  м/с,  $\mu = 0,1$  (см. рис. 2). Моделирование показало [11], что при движении вдоль поверхности с ползучей скоростью порядка  $\dot{x}^d = 0,01$  м/с в системе возникают фрикционные автоколебания (рис. 3). Для рассматриваемого примера частота и амплитуда автоколебаний равны соответственно  $\omega_A = 76$  рад/с (12 Гц) и  $A = 0,012$  м/с.

Моделировалась ситуация, когда в течение первой секунды робот выходил на контакт с поверхностью до достижения силы прижатия  $F_y^d = 40$  Н. После чего начиналась обработка предписанного движения вдоль горизонтальной оси со скоростью  $v_x^d = 0,01$  м/с.

Характер процессов, приведенных на рис. 3, хорошо согласуется с процессами, наблюдаемыми на практике [12]. Модель трения с учетом Штрибек-эффекта оказалась вполне адекватной для описания кратковременных остановок инструмента при движении на ползучей скорости вдоль обрабатываемой поверхности в условиях прижатия к ней.

Для подавления фрикционных автоколебаний в контур горизонтального движения дополнительно к  $\dot{x}^d$  вводилась составляющая  $v_{ex}$

$$v_{ex}(t) = \begin{cases} B \sin(\omega_B t), & v_{ex} > 0 \\ 0, & v_{ex} \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

амплитуду  $B$  и частоту  $\omega_B > \omega_A$  которой можно было варьировать. Эффективное подавление фрикционных автоколебаний получено при  $B = 0,025$  м/с,  $\omega_B = 300$  рад/с.

На рис. 4 приведены процессы подавления фрикционных автоколебаний. Дополнительное воздействие подавалось в систему в момент начала движения робота вдоль горизонтальной оси. Видно, что в этом случае на

ползучей скорости автоколебания не возникают, и после небольшого переходного процесса скорость инструмента устанавливается на некотором уровне  $v_{sx} = 0,018$  м/с, превышающем  $\dot{x}^d$ . Это превышение обусловлено ненулевым средним значением импульсного воздействия (4). Поэтому при варьировании амплитуды  $B$  следует ориентироваться на минимальное эффективное значение.

На рис. 5 приведены графики процессов при снятии внешнего высокочастотного импульсного воздействия.

Подача импульсов осуществлялась в течение 0,5 с. Затем импульсное воздействие снималось. Видно, что после снятия импульсного воздействия автоколебания возобновляются.

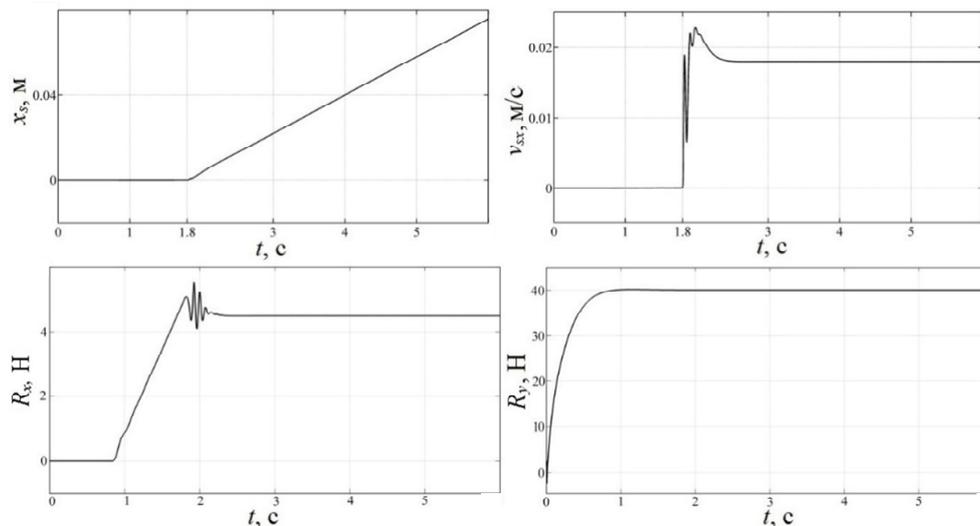


Рис. 4. Процессы подавления фрикционных автоколебаний с помощью импульсного воздействия

Fig. 4. The processes of suppression of friction self-oscillations using pulsed exposure

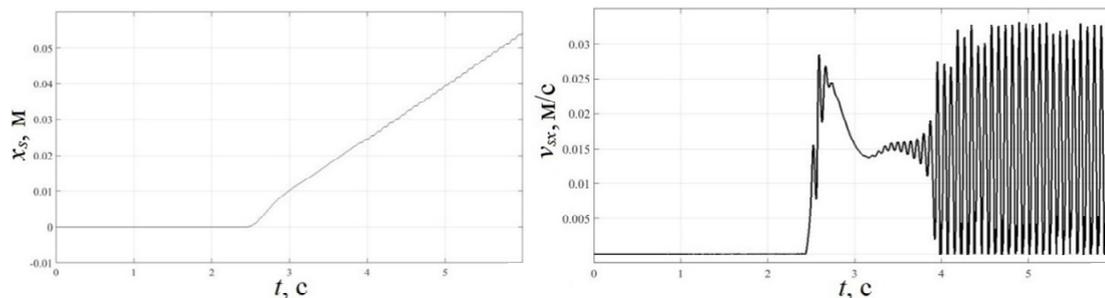


Рис. 5. Процессы повторного возникновения фрикционных автоколебаний при снятии импульсного воздействия

Fig. 5. The processes of re-emergence of friction self-oscillations when removing the pulse effect

### Адаптивное управление импульсным сглаживанием

В предыдущем разделе показана принципиальная возможность подавления фрикционных автоколебаний с помощью высокочастотного внешнего импульсного воздействия. Также установлено, что при снятии импульсного воздействия в системе вновь возникают автоколебания (см. рис. 5). В целях снижения общей вибрационной нагрузки на робота необходимо включать импульсное воздействие только тогда, когда возникают автоколебания. А при их отсутствии импульсное воздействие должно сниматься. Иными словами, необходимо сделать систему управления адаптивной. В данной работе адаптация осуществлялась с помощью логического блока (рис. 6).

Для адаптации законов управления необходимо определить сигналы, по которым можно производить включение и выключение дополнительного внешнего импульсного воздействия. Для формирования переключающего устройства проанализируем процессы в системе «робот-инструмент-обрабатываемая поверхность» непосредственно перед возникновением автоколебаний и перед установлением равномерного движения при импульсном сглаживании.

При появлении в системе автоколебаний переходные процессы по горизонтальной силе  $R_x$  и горизонтальной скорости  $v_{sx}$

будут иметь ярко выраженный колебательный характер с частотой, равной частоте автоколебаний (см. рис. 3). В этой ситуации появление автоколебаний в системе можно зафиксировать с помощью фильтра высоких частот (ФВЧ), пропуская через него сигнал  $R_x$  с соответствующего силового сенсора. При таком преобразовании первый импульс сигнала  $R_x^*$  на выходе фильтра будет свидетельствовать о том, что в системе возникают автоколебания, и в момент времени появления данного импульса необходимо включать высокочастотное импульсное воздействие. На рис. 7 приведены графики соответствующих процессов  $R_x$  и  $R_x^*$  после пропускания через ФВЧ.

При моделировании оказалось, что включение внешнего импульсного воздействия должно произойти в момент времени  $t_{on} = 2,3$  с. Результатом его действия на систему должно стать равномерное движение инструмента вдоль горизонтальной оси без кратковременных остановок. Поэтому в качестве сигнала выключения может использоваться информация с датчика скорости по горизонтальной координате  $v_x = \dot{x}$ . При достижении равномерного движения по горизонтальной координате импульсное воздействие следует выключать. На рис. 8 приведены графики процессов  $v_x$  и  $v_x^*$  после пропускания через ФВЧ соответственно.

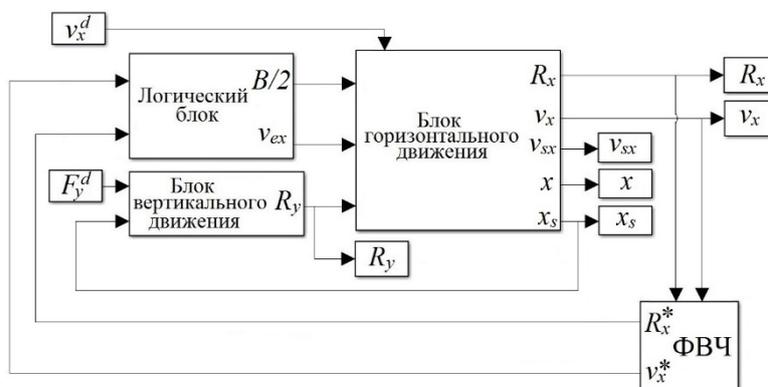


Рис. 6. Структурная схема системы управления

Fig. 6. Control system block diagram

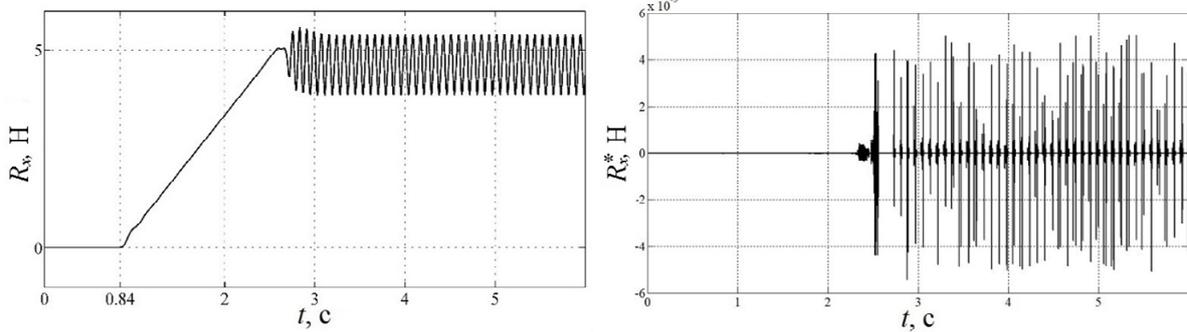


Рис. 7. Процессы в системе  $R_x$  до и  $R_x^*$  после пропускания через ФВЧ

Fig. 7. Processes in the system  $R_x$  and  $R_x^*$  after passing through the High-pass Filters

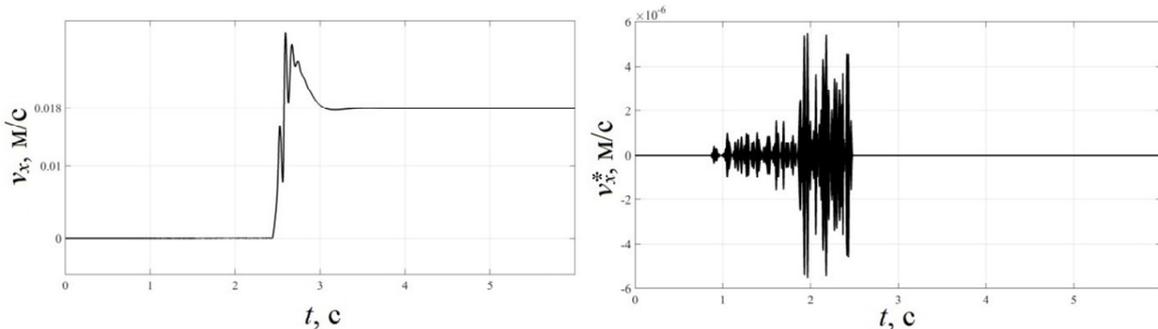


Рис. 8. Процессы в системе  $v_x$  до и  $v_x^*$  после пропускания через ФВЧ

Fig. 8. Processes in the system  $v_x$  and  $v_x^*$  after passing through the High-pass Filters

Сигналом к выключению внешнего импульсного воздействия будет служить последний импульс в процессе  $v_x^*$ . Момент времени выключения берется с некоторым запасом  $\Delta t$ . При моделировании момент времени выключения внешнего импульсного воздействия составлял  $t_{off} = 2,6 + 0,2$  с. Таким образом, подача импульсов внешнего воздействия осуществлялась только в течение 0,5 с.

Для предотвращения повторного возникновения автоколебаний в момент выключения импульсного воздействия следует увеличить задание по скорости  $v_x^d$  на величину  $B/2$ . Небольшое увеличение предписанной скорости  $v_x^d$  исключает условия возникновения фрикционных автоколебаний, т. к. при увеличении предписанной скорости система как бы «проскакивает» падающий участок на характеристике трения (см. рис. 2).

В итоге получаем следующую логическую схему. Включение внешнего импульсного воздействия происходит по первому импульсу сигнала  $R_x^*$ , пропущенного через

ФВЧ, выключение по сигналу  $v_x^*$  – при достижении равномерного движения вдоль горизонтальной оси. В момент снятия импульсного воздействия происходит небольшое увеличение задания на горизонтальную скорость до значения  $\tilde{v}_x^d = v_x^d + B/2$  (рис. 9), при котором пропадают условия для возникновения автоколебаний. При таких переключениях автоколебания эффективно подавляются, а время импульсного воздействия на систему составляет менее секунды. Такой метод позволяет оперативно сгладить неблагоприятную динамику системы при условии, что увеличение задания на горизонтальную скорость не приводит к нарушению технологии. В противном случае необходимо изменение технологических требований.

Моделирование полного цикла движения показало эффективность предложенного подхода. Переходные процессы в системе «робот-инструмент-обрабатываемая поверхность» с дополнительным логическим блоком приведены на рис. 10.

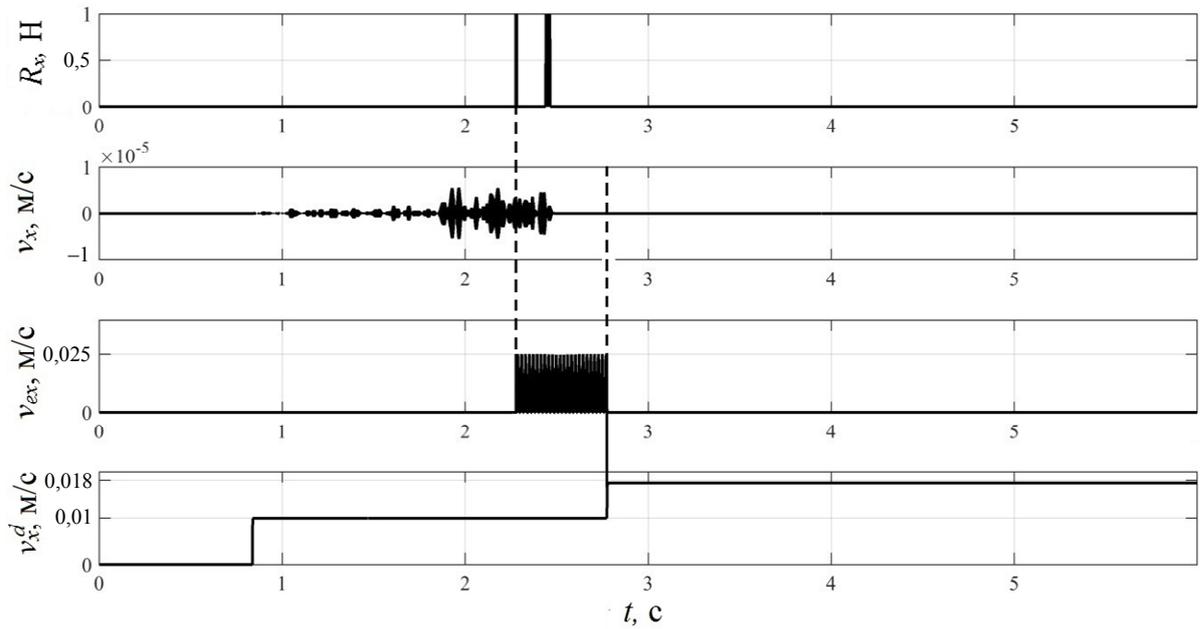


Рис. 9. Сигналы включения/выключения импульсного воздействия

Fig. 9. Pulse on/off signals

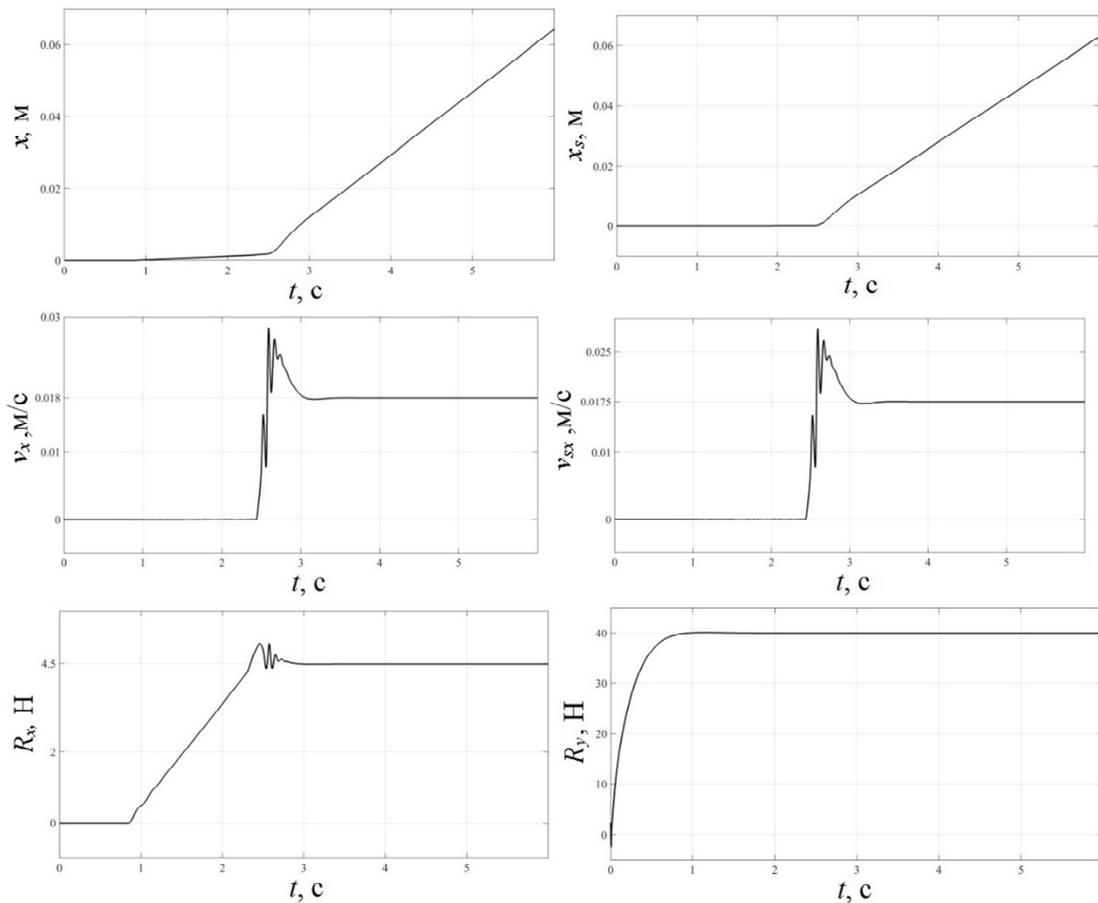


Рис. 10. Процессы в системе в условиях адаптивного импульсного сглаживания фрикционных автоколебаний

Fig. 10. Processes in the system under conditions of adaptive impulse smoothing of friction self-oscillations

### Заключение

Задачи с контактным взаимодействием роботов с другими объектами относятся к актуальным и наиболее сложным в робототехнике, т. к. алгоритмы управления приходится создавать с учетом сил и моментов, возникающих в области контакта. Чтобы иметь соответствующую информацию, такой робот должен обладать силомоментным очувствлением. Наличие силомоментного очувствления позволяет вводить в систему управления элементы искусственного интеллекта, такие как обучение, нечеткая логика, нейросети и т. д. Искусственный интеллект в задачах с контактным взаимодействием необходим в силу сложности физико-механических процессов, протекающих в области контакта.

Исследования многих авторов [5, 13, 14] показывают, что в большинстве случаев адекватные модели взаимодействия должны иметь нестационарный, нелинейный, динамический характер. Рассмотренная в данной статье модель трения с

падающей характеристикой при малых относительных скоростях при движении робота вдоль обрабатываемой поверхности в условиях инерционности и податливости элементов робота раскрывает только одну из возможных причин появления автоколебаний. Большой класс задач по моделированию физико-механических процессов в области контактного взаимодействия охватывает проблемы, возникающие при механообработке, такие как недопустимо высокий уровень вибраций, первичные и вторичные (регенеративные) автоколебания при точении и фрезеровании, неустойчивость процессов.

Таким образом, главные направления дальнейших исследований в данной области должны быть связаны с физическими экспериментами и совершенствованием моделей физико-механических процессов при контактных взаимодействиях, а также с повышением уровня интеллектуализации алгоритмов управления роботами, ориентированных на расширение класса решаемых задач.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Егоров И.Н.** Позиционно-силовое управление робототехническими и мехатронными устройствами. Владимир: Изд-во Владимир. гос. ун-та, 2010. 192 с.

2. **Гориневский Д.М., Формальский А.М., Шнейдер А.Ю.** Управление манипуляционными системами на основе информации об усилиях. М.: Физматлит, 1994. 368 с.

3. **Altintas Y.** Metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design. 2nd ed. Cambridge University press, 2012. 382 p.

4. **Попов В.Л.** Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений. М.: Физматлит, 2013. 352 с.

5. **Бурдаков С.Ф., Шагниев О.Б.** Модели механики в задаче управления силовым взаимодействием робота с поверхностью неопределенного профиля // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2015. № 4. С. 68–79. DOI: 10.5862/JCSTCS.224.7

6. **Гайворонский Е.Г., Кеглин Б.Г.** Особенности фрикционных автоколебаний в контину-

альной системе // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2010. № 11. С. 3–9.

7. **Крагельский И.В., Гитис Н.В.** Фрикционные автоколебания. М.: Наука, 1987. 181 с.

8. **Рассказчиков Н.Г.** Управление промышленными роботами для абразивной зачистки с использованием силомоментной адаптации // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6 // URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=16772>

9. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=qIFGmlO9Uek>

10. URL: [https://www.youtube.com/watch?v=1JdH\\_ytpzpk](https://www.youtube.com/watch?v=1JdH_ytpzpk)

11. **Байдина Т.А., Бурдаков С.Ф.** Управление автоколебаниями при контактном взаимодействии робота с обрабатываемой поверхностью в условиях нелинейного трения // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2018. Т. 11. № 1. С. 65–74. DOI: 10.18721/JCSTCS.11106

12. **Каширин А.И.** Исследование вибраций при резании. М.: Изд-во АН СССР, 1944. 262 с.

13. Tobias S.A., Fishwick W. The chatter of lathe tools under orthogonal cutting conditions // Transactions of ASME. 1958. Vol. 80. Iss. 1. Pp. 1079–1088.

14. Tlustý J., Poláček M. The stability of the machine tools against self-excited vibrations in machining // International Research in Production Engineering. 1963. Vol. 1. Iss. 1. Pp. 465–474.

Статья поступила в редакцию 20.11.2018.

#### REFERENCES

1. Yegorov I.N. *Pozitsionno-silovoye upravleniye robototekhnicheskimi i mekhatronnymi ustroystvami* [Positional-power control of robotic and mechatronic devices]. Vladimir. State University Publ., 2010, 192 p. (rus)

2. Gorinevskiy D.M., Formalskiy A.M., Shneyder A.Yu. *Upravleniye manipulyatsionnymi sistemami na osnove informatsii ob usiliyakh* [Manage handling systems based on effort information]. Moscow: Fizmatlit Publ., 1994, 368 p. (rus)

3. Altintas Y. *Metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design*. 2nd ed. Cambridge University press, 2012, 382 p.

4. Popov V.L. *Contact mechanics and friction physics. From nanotribology to earthquake dynamics*. Moscow: Fizmatlit Publ., 2013, 352 p. (rus)

5. Burdakov S.F., Shagniyev O.B. Mechanics models in the control problem of the force interaction between a robot and a free-formed surface. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control Systems*, 2015, No. 4, Pp. 68–79. DOI: 10.5862/JCSTCS.224.7 (rus)

6. Gayvoronskiy Ye.G., Keglín B.G. The features of frictional self-oscillations in a continuous system. *Friction & Lubrication in Machines and Mechanisms*, 2010, No. 11, Pp. 3–9. (rus)

7. Kragelskiy I.V., Gitis N.V. *Friktsionnyye avtokolebaniya* [Friction auto-oscillations]. Moscow: Nauka Publ., 1987, 181 p. (rus)

8. Rasskazchikov N.G. Upravleniye promyshlennymi robotami dlya abrazivnoy zachistki s ispolzovaniyem silomomentnoy adaptatsii [Control of industrial robots for abrasive cleaning using force-moment adaptation]. *Sovremennyye problem nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2014, No. 6. Available: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=16772> (rus)

9. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=qIFGmlO9Uek>

10. Available: [https://www.youtube.com/watch?v=IJdH\\_ytpzpk](https://www.youtube.com/watch?v=IJdH_ytpzpk)

11. Baydina T.A., Burdakov S.F. Control of self-oscillations in contact interaction of a robot with a treated surface under nonlinear friction. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control Systems*, 2018, Vol. 11, No. 1, Pp. 65–74. DOI: 10.18721/JCSTCS.11106

12. Kashirin A.I. *Issledovaniye vibratsiy pri rezanii* [Investigation of vibrations during cutting]. Moscow: AN USSR Publ., 1944, 262 p. (rus)

13. Tobias S.A., Fishwick W. The chatter of lathe tools under orthogonal cutting conditions. *Transactions of ASME*, 1958, Vol. 80, Iss. 1, Pp. 1079–1088.

14. Tlustý J., Poláček M. The stability of the machine tools against self-excited vibrations in machining. *International Research in Production Engineering*, 1963, Vol. 1, Iss. 1, Pp. 465–474.

Received 20.11.2018.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

**БАЙДИНА Татьяна Александровна**

**BAIDINA Tatyana A.**

E-mail: baydinatanya2401@gmail.com

**БУРДАКОВ Сергей Федорович**

**BURDAKOV Sergey F.**

E-mail: burdakov.s@yandex.ru

**ШАГНИЕВ Олег Булатович**

**SHAGNIEV Oleg B.**

E-mail: shagnoleg@yandex.ru